

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)
УДК 621.81

Поступила в редакцию 20.10.2017
Received 20.10.2017

В. Л. Басинюк

Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

ДИНАМИКА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПРИВОДАХ С ГИБКОЙ СВЯЗЬЮ ПРИ РАЗДЕЛЕНИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАСТИН НА КРИСТАЛЛЫ АЛМАЗНЫМ КРУГОМ

Аннотация. Показаны возможности увеличения скорости резания при одновременном повышении точности координатных перемещений и снижения динамических нагрузок в начальный, наиболее опасный с позиции возникновения сколов и поломок, момент взаимодействия алмазного круга толщиной 15–120 мкм с полупроводниковой пластиной толщиной 250–500 мкм и диаметром 50–250 мм при ее разделении на кристаллы. При резании стол с полупроводниковой пластиной совершает возвратно-поступательные координатные циклические перемещения. В процессе его разгона до рабочей скорости подачи возникают механические колебания в направлении движения, имеющие частоту собственных колебаний. Эти колебания могут приводить к отклонению стола от заданной координаты и возникновению существенно отличных от прогнозируемых величин ускорений при достижении рабочей скорости подачи и последующем контакте пластины с алмазным кругом. Это может быть учтено при реализации технологического цикла, и в ряде случаев колебаниями можно программно управлять путем выбора рационального соотношения величин рабочего хода, длины холостого хода и частоты собственных колебаний, что позволяет уменьшить или исключить сколы и поломки полупроводниковой пластины и алмазного круга, уменьшить их толщины и повысить в 1,5–2 раза скорость обработки. Показаны возможности создания комбинированной системы приводов, использование которой позволяет исключить возникновение механических колебаний.

Ключевые слова: динамика, колебания, комбинированная система приводов, кристаллы, полупроводниковая пластина, точное электронное машиностроение

Для цитирования. Басинюк, В. Л. Динамика переходных процессов в приводах с гибкой связью при разделении полупроводниковых пластин на кристаллы алмазным кругом / В. Л. Басинюк // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2018. – Т. 63, № 1. – С. 68–75.

U. L. Basiniuk

Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

DYNAMICS OF TRANSITION PROCESSES IN DRIVE MECHANISM WITH FLEXIBLE COMMUNICATION AT WAFER SEPARATION BY A DIAMOND WHEEL

Abstract. Possibilities of increase of cutting speed at simultaneous increase of accuracy of coordinate movements and decrease of dynamical loads at initial, the most dangerous from emergence of chips and breakages, moment of interaction of 15–120 microns thick diamond wheel with a wafer having 250–500 microns thickness and diameter of 50–250 mm, at its chipping are shown. The table with a wafer makes reciprocal coordinate cyclic movements at cutting. In the course of its acceleration to working feed rate there are mechanical oscillations in the direction of driving, which have natural frequency. These oscillations can lead to a table deviation from the machine coordinate and to occurrence of accelerations, significantly differ with predicted ones, at achievement of working feed rate and subsequent contact of a wafer with a diamond wheel. That can be considered at realization of a production cycle, and, in some cases, oscillations can be operated programmatically by the choice of rational ratios of values of working stroke, length of non-working stroke and free frequency that allows reducing or exclusion of chips and breakages of wafers and diamond wheel, reducing their thickness and increasing processing speed by 1,5–2 times. Possibilities of creation of combined system of drives which use allows exclusion emergence of mechanical oscillations are shown.

Keywords: dynamics, oscillations, the combined system of drives, chips, a semiconductor wafer, precise electronic engineering

For citation. Basiniuk U. L. Dynamics of transition processes in drive mechanism with flexible communication at wafer separation by a diamond wheel. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk* = *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 1, pp. 68–75 (in Russian).

Ведение. Рассматривая перспективы развития микроэлектроники американская ассоциация Semiconductor Industry Association (SIA) и консорциум Semiconductor Research Corporation (SRC) отметили, что объем продукции в этой области производства каждое десятилетие возрастает в 2–2,5 раза. При этом размеры лежащих в основе этой продукции микрочипов (кристаллов) будут постоянно уменьшаться. Произойдет постепенный переход топологической нормы изготовления твердотельных интегральных схем от 28–65 к 10–22 нм [1].

В процессе изготовления микрочипов разделение полупроводниковых пластин на кристаллы осуществляется в основном резанием алмазным кругом толщиной 15–120 мкм. Толщина пластин составляет 250–500 мкм и менее при их диаметре 50–450 мм. Технологическое оборудование для разделения полупроводниковых пластин алмазным кругом имеет программно-управляемый привод с зубчато-ременной передачей, обеспечивающей кинематическую и силовую связь электромотор-редуктора с подвижным столом, на котором размещена разрезаемая полупроводниковая круглая пластина. Инкрементальный датчик для контроля перемещений стола в направлении его рабочего перемещения установлен на валу двигателя. Точность координатных перемещений в квазистатическом режиме движения составляет 10–20 мкм.

При перемещении стола в заданную координату в процессе его дальнейшего разгона до рабочей скорости подачи из-за наличия упругой связи между ним и мотор-редуктором возникают механические колебания с собственной частотой в направлении движения стола. Амплитуда этих колебаний при минимизации длины разгона и использовании скоростных подач в момент достижения рабочей скорости подачи может быть значительной, вследствие чего координата положения стола и его ускорение в ряде случаев существенно отличаются от прогнозируемых. Это приводит к повышенным динамическим нагрузкам при взаимодействии алмазного круга с полупроводниковой пластиной и, как следствие, возникновению на ней и алмазном круге сколов или их разрушению. Снижается производительность и выход годных кристаллов, возникает необходимость использования относительно невысоких скоростей обработки [1].

Следует отметить, что разделение полупроводниковых пластин на кристаллы является по существу финишной операцией, на которой стоимость пластин может достигать 30 тыс. долл. США. Таким образом, установление закономерностей, связывающих координатные перемещения стола и его ускорения при разгоне до рабочей скорости подачи, а также разработка технических решений, позволяющих исключить механические колебания при переходных процессах, имеет не только научное, но и практическое значение.

Целью исследований являлось установление закономерностей, связывающих координатные перемещения стола и его ускорения при разгоне до рабочей скорости подачи, разработка рекомендаций по обеспечению соответствия действительных и прогнозируемых координат, снижению ускорений и, как следствие, динамической нагруженности алмазного круга и полупроводниковой пластины в начальный момент их взаимодействия, а также предложений по созданию приводной системы, позволяющей на порядок и более снизить или исключить механические колебания стола при переходных процессах.

Методика и объект исследований. В качестве базовой принята схема программно-управляемого привода (рис. 1, а) серийно изготавливаемой прецизионной установки М-2085В ОАО «Планар» (рис. 1, б), в которой разгон стола до рабочей скорости подачи осуществляется с постоянным ускорением.

При разработке модели движения стола в процессе его разгона с используемым в установке М-2085 постоянным ускорением a до рабочей скорости подачи были приняты следующие допущения [1, 2]:

трением в сопряжениях шкива с зубчатым ремнем и в подшипниковых узлах шкива можно пренебречь;

коэффициенты вязкоупругого трения в механической системе и безразмерные коэффициенты затухания колебаний постоянны;

усилия сопротивления движению стола постоянны.

Процесс разгона стола до рабочей скорости подачи может быть разделен на два периода.

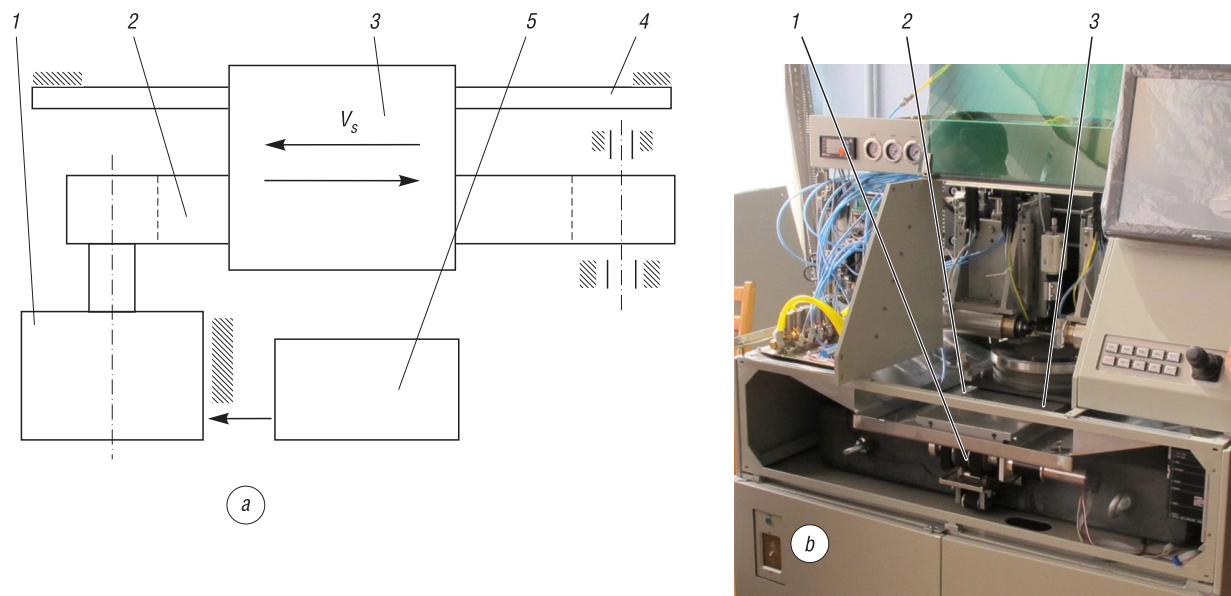


Рис. 1. Условная схема привода (а) и общий вид установки для разделения полупроводниковых пластин на кристаллы М-2085 ОАО «Планар» (b): 1 – мотор-редуктор, 2 – зубчато-ременная передача, 3 – стол, 4 – линейная направляющая, 5 – модуль программного управления приводом

Fig. 1. The conditional scheme of the drive (a) and general form of device M-2085 of Planar Corporation for wafer separation: 1 – motor reducer, 2 – toothed belt drive, 3 – table, 4 – linear sliding bearing, 5 – module of program control of the drive

В первом периоде двигатель начинает вращение в момент времени t_0 , стол массой m еще неподвижен и происходит плавная упругая деформация зубчатого ремня, имеющего жесткость C_p , до величины в момент времени $t = 0$, при которой натяжение ремня и соответствующая ему сила тяги привода становится равной силе сопротивления движению стола.

Второй период времени – от $t = 0$ до $t = t_1$, в котором стол движется с постоянным ускорением a , разгоняясь на отрезке l_1 за прогнозируемое время t_1 до рабочей скорости подачи V_S .

В соответствии с [1] дифференциальное уравнение движения стола при его разгоне до рабочей скорости подачи может быть записано в следующем виде:

$$\ddot{x} + u_m \omega_m \dot{x} + \omega_m^2 x = \omega_m^2 \frac{V_S}{2t_1} t^2, \quad (1)$$

где x – величина перемещения (координата) стола от начала его движения, мм; u_m – безразмерный коэффициент затухания механических колебаний, связанный с логарифмическим декрементом затухания γ соотношением $\gamma = \pi u_m$ ($\pi = 3,14159 \dots$); ω_k – угловая частота собственных колебаний стола в направлении его движения (с^{-1}), определяемая из соотношения $\omega_m^2 = C_p/m$ (m – масса стола, кг).

Поскольку при постоянном ускорении $V_S = at_1$ и $l_1 = 0,5at_1^2$, то $t_1 = 2l_1/V_S$.

Тогда с учетом начальных условий $x_0 = 0$ и $\dot{x}_0 = 0$ решение дифференциального уравнения (1), описывающего движение стола в период его разгона до рабочей скорости подачи, имеет вид

$$x = \frac{V_S^2}{2l_1\omega_m^2} \left[e^{-\frac{\omega_m}{2}u_mt} \frac{\sin\left(\omega_m\sqrt{1-u_m^2/4} \cdot t + \varphi_1\right)}{\sqrt{1-u_m^2/4}} + 0,5t^2\omega_m^2 - \omega_mu_mt + u_m^2 - 1 \right], \quad (2)$$

$$\dot{x} = \frac{V_S^2}{2l_1\omega_m} \left[-e^{-\frac{\omega_m}{2}u_mt} \frac{\sin\left(\omega_m\sqrt{1-u_m^2/4} \cdot t + \varphi_1 - \varphi_2\right)}{\sqrt{1-u_m^2/4}} + t\omega_m - u_m \right], \quad (3)$$

$$\ddot{x} = \frac{V_S^2}{2l_1} \left[e^{-\frac{\omega_m}{2}u_mt} \frac{\sin\left(\omega_m\sqrt{1-u_m^2/4} \cdot t + \varphi_1 - 2\varphi_2\right)}{\sqrt{1-u_m^2/4}} + 1 \right], \quad (4)$$

$$\text{где } \varphi_1 = \arctg \frac{(1-u_m^2)\sqrt{1-u_m^2/4}}{u_m(1,5-0,5u_m^2)}, \varphi_2 = \arctg \frac{2\sqrt{1-u_m^2/4}}{u_m}.$$

В реальном диапазоне значений u_m ($u_m \approx 0,1 \dots 0,3$) с приемлемой для инженерной практики точностью может быть принято $\sqrt{1-u_m^2/4} \approx 1$, смещение фазы колебаний \dot{x} относительно фазы колебаний x составляет $\varphi_2 \approx \pi/2$, а фазы колебаний \ddot{x} относительно фазы колебаний $x - 2\varphi_2 \approx \pi$. С учетом этого зависимости (2)–(4) могут быть представлены в более удобном для исследований (количество переменных приведено к двум – u_m и q) безразмерном виде:

$$\frac{x}{l_1} = \frac{2}{q^2} \left[e^{-\frac{qu_m t}{2t_1}} \cdot \sin\left(q \frac{t}{t_1} + \varphi_1\right) + 0,5q^2 \frac{t^2}{t_1^2} - qu_m \frac{t}{t_1} + u_m^2 - 1 \right], \quad (5)$$

$$\frac{\dot{x}}{V_S} = \frac{1}{q} \left[-e^{-\frac{qu_m t}{2t_1}} \cos\left(\frac{t}{t_1} + \varphi_1\right) + q \frac{t}{t_1} - u_m \right], \quad (6)$$

$$\frac{\ddot{x}}{a} = 1 - e^{-\frac{qu_m t}{2t_1}} \left[\sin\left(q \frac{t}{t_1} + \varphi_1\right) \right], \quad (7)$$

где $q = 2\omega_m l_1 / V_S$ – безразмерный параметр, комплексно учитывающий соотношение длины холостого хода l_1 при разгоне стола до рабочей скорости подачи V_S , величину этой подачи и угловую частоту собственных колебаний стола ω_m в направлении его движения.

В момент времени t_{V_S} достижения столом скорости рабочей подачи V_S уравнение (6) может быть представлено в следующем виде:

$$\frac{t_{V_S}}{t_1} = \frac{e^{-\frac{qu_m t_{V_S}}{2t_1}} \cos\left(\frac{t_{V_S}}{t_1} + \varphi_1\right)}{q}. \quad (8)$$

В работе [1] показано, что скоростным режимам резания соответствуют значения безразмерного параметра q , равные $q = 2 \div 12$. Поэтому дальнейшие исследования были проведены для данного диапазона величин q .

Результаты и их обсуждение. Решение трансцендентного уравнения (8) приведено в графическом виде на рис. 2, а, а соответствующие этому моменту времени, то есть достижению столом рабочей скорости подачи, отношения l_{V_S}/l_1 и \ddot{x}_{V_S}/a , которые характеризуют соответственно погрешность координатного положения стола и его ускорение, – на рис. 2, б.

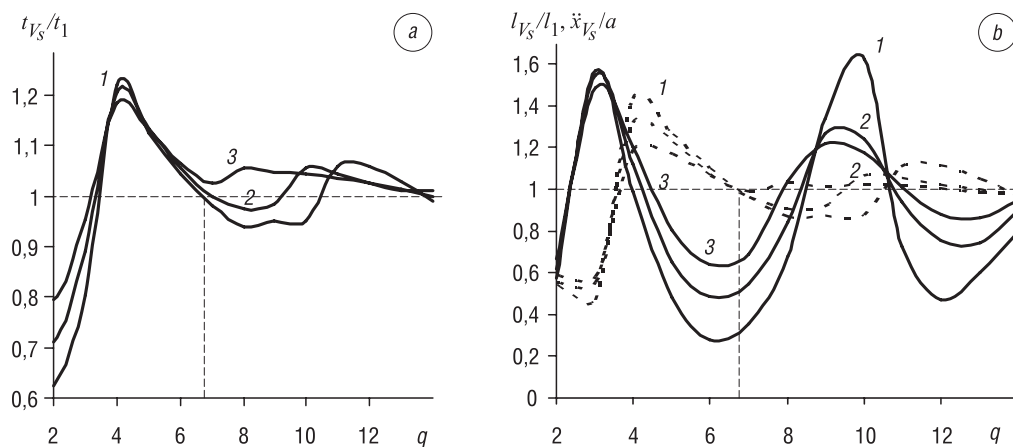


Рис. 2. Закономерности изменения t_{V_S}/t_1 (а) и соответствующих t_{V_S}/t_1 отношений l_{V_S}/l_1 (---) и \ddot{x}_{V_S}/a (—) стола (б) при увеличении значения безразмерного параметра q от 2 до 12: 1, 2, 3 – значения u_m , соответственно равные 0,1, 0,2 и 0,3
Fig. 2. Regularities of change of t_{V_S}/t_1 (a) and corresponding t_{V_S}/t_1 relations of l_{V_S}/l_1 (---) and \ddot{x}_{V_S}/a (—) of table (b) at increase of value of the dimensionless parameter q from 2 to 12: 1, 2, 3 – u_m values, respectively equal 0,1, 0,2 and 0,3

Анализ рис. 2 показывает, что возникновение механических колебаний стола с частотой его собственных колебаний в направлении движения в процессе его разгона до рабочей скорости подачи при скоростной обработке полупроводниковых пластин в процессе их разделения на кристаллы приводит к тому, что действительные время достижения столом рабочей скорости подачи (рис. 2, *a*), а также координата его расположения и ускорение могут значительно отличаться от прогнозируемых. При этом величины этих отличий периодически изменяются. Они существенно зависят от значения безразмерного параметра q , то есть соотношения длины холостого хода l_1 при разгоне стола до рабочей скорости подачи V_S , величины этой подачи и угловой частоты собственных колебаний стола ω_m в направлении его движения, а также от демпфирующих свойств механической системы. С увеличением q величины отклонений действительных координаты и ускорения от прогнозируемых снижаются. Эти отличия по времени могут достигать 20 % и более (рис. 2, *a*), по координате – 20÷40 %, то есть для длины рабочего хода $l_1 = 10$ мм они составят 2÷4 мм при допустимой величине отклонения не более 0,05 мм, а по ускорению – в 1,2÷1,6 раза (рис. 2, *b*).

Вместе с тем может быть подобрано и обеспечено на стадии проектирования или отладки оборудования для разделения полупроводниковых пластин на кристаллы такое соотношение длины холостого хода l_1 , величины рабочей скорости подачи V_S , угловой частоты собственных колебаний стола ω_m , при котором контролируемое системой управления оборудованием время достижения столом рабочей скорости подачи и координата его расположения будут практически совпадать с планируемым, а ускорение – ниже прогнозируемого в 1,4–4 раза. В рассматриваемом случае это значение $q \approx 6,3$ (см. рис. 2).

В [1] показано, что такая величина q может быть комплексно обеспечена подбором и программно-управляемым варьированием жесткостью зубчато-ременной передачи путем изменения ее натяжения, технически обоснованным выбором массы стола с учетом планируемых режимов обработки и экономически обоснованным назначением длины холостого хода.

Реализация этого подхода позволяет создать качественно лучшие условия динамического взаимодействия алмазного круга с полупроводниковой пластиной и вследствие этого существенно уменьшить или исключить их сколы и поломки. Значительно шире становятся возможности реализации повышенных в 1,5–2 раза скоростей обработки с использованием современных инструментальных материалов, уменьшения толщины полупроводниковых пластин и увеличения их диаметра. Вместе с тем для радикального решения проблем, обусловленных механическими колебаниями рабочего стола при его разгоне до рабочей скорости подачи, может быть использовано разработанное в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси техническое решение с комбинированной системой привода и специализированными алгоритмами управления тяговым усилием при его разгоне до рабочей скорости подачи (Патент ЕА №024502, МПК 6 B23Q 5/28, H02K 41/035 «Привод перемещения координатного устройства и способ его управления»; Патент Республики Беларусь №20689, МПК 6 B 23Q 5/22 «Привод перемещения координатного устройства для подачи режущего инструмента»). Схема одного из таких решений показана на рис. 3.

К основной особенности приведенной на рис. 3 комбинированной системы приводов можно отнести наличие непосредственно связанного со столом двухфазного линейного электродвигателя, формирующего при разгоне стола одновременно с основным, создаваемым приводом с зубчато-ременной передачей, дополнительное тяговое усилие.

Алгоритм управления основным и дополнительным тяговыми усилиями комбинированного привода перемещения координатного устройства определяется исходя из следующего:

изменение во времени t основного тягового усилия F_{dc} , обеспечивающего упругое растяжение зубчатого ремня до величины F_{xx} , соответствующей его упругому растяжению при движении стола в режиме холостого хода со скоростью подачи V_S , принято линейным, то есть

$$F_{dc}(t) = k_d F_{xx}(t + t_1); \quad (9)$$

изменение дополнительного тягового усилия по времени t принято параболическим, то есть

$$F_{da}(t) = k_{da} F_{xx} - k_a F_{xx}(t - 0,5t_1 - 0,5t_0)^2, \quad (10)$$

где k_d – коэффициент пропорциональности изменения величины F_{dc} во времени t , c^{-1} ; t – текущее время, с; t_1 – время, за которое скорость подачи стола достигнет требуемой величины, с; t_0 – вре-

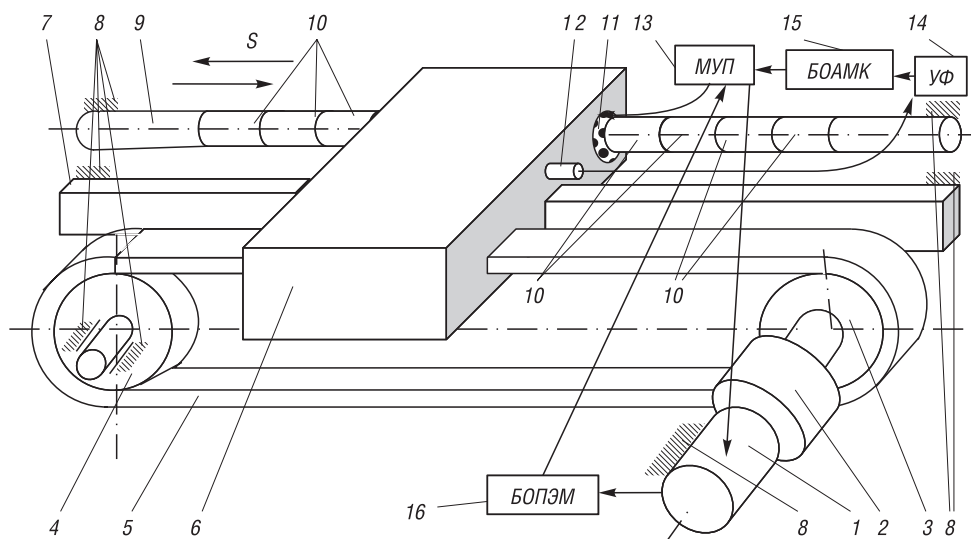


Рис. 3. Условная схема комбинированной системы привода установки для разделения полупроводниковых пластин на кристаллы: 1 – электродвигатель; 2 – редуктор; 3, 4 – шкивы зубчато-ременной передачи; 5 – зубчатый ремень; 6 – стол, жестко связанный с зубчатым ремнем 5 посредством зубчатой рейки; 7 – направляющая; 8 – основание; 9 – статор двухфазного линейного электродвигателя; 10 – постоянные магниты статора в виде втулок, входящих с зазором в сквозное отверстие в столе 6, выполненное параллельно направляющей 7; 11 – якорь двухфазного линейного электродвигателя, состоящий из коаксиально установленных по отношению к постоянным магнитам 10 статора двух кольцевых катушек индуктивности, размещенных последовательно вдоль оси вала 9 в отверстии подвижного стола 6; 12 – пьезоэлектрический датчик для контроля параметров колебаний подвижного стола 6 в направлении его движения; 13 – программируемый модуль управления приводом (МУП); 14 – узкополосный фильтр (УФ); 15 – блок определения амплитуды механических колебаний стола с частотой собственных колебаний (БОАМК); 16 – блок определения потребляемой электродвигателем мощности (БОПЭМ)

Fig. 3. The conditional scheme of the combined system of the drive of installation for wafer separation: 1 – electric motor; 2 – reducer; 3, 4 – sheaves of the tooth-belt drive; 5 – gear belt; 6 – the table bound to a gear belt 5 by means of a gear rack; 7 – guide; 8 – basis; 9 – stator of the two-phase linear electric motor; 10 – permanent magnets of the stator in the form of plugs and entering with a gap the through hole in a table 6 executed parallel to a guide 7; 11 – the anchor of the two-phase linear electric motor consisting of two toroidal coils which are coaxially established in relation to permanent magnets 10 of stator casing placed sequentially along an axis of a shaft 9 in an opening of the sliding table 6; 12 – a piezoelectric sensor for monitoring of oscillation properties of the sliding table 6 in the direction of its driving; 13 – programmable module of control of the drive (MCD); 14 – narrow-band filter (NBF); 15 – the block of determination of amplitude of mechanical oscillations of a table with a natural frequency (BOAMK); 16 – block of determination of the power consumed by the electric motor (BDPCEM)

мя начала формирования основного и дополнительного тяговых усилий, с; k_{da} – безразмерное отношение максимального значения дополнительного тягового усилия к тяговому усилию холостого хода; k_a – коэффициент, характеризующий отношение максимального значения F_{da} к F_{xx} и имеющий размерность c^{-2} .

Так как в момент времени t_1 величина основного тягового усилия достигает значения F_{xx} , то

$$F_{dc|t=t_1} = F_{xx} = k_d F_{xx}(t_1 + t_0), \quad (11)$$

откуда

$$k_d = 1/(t_1 + t_0), \quad (12)$$

где $k = \frac{1}{1 - t_0/t_1}$ (т. к. $t_0 < 0$, то $-1 < t_0/t_1 < 0$ и k всегда лежит в диапазоне $0 < k < 1$).

Тогда выражение (10) может быть приведено к виду

$$F_{dc}(t) = F_{xx}[1 - k(1 - t/t_1)]. \quad (13)$$

Так как в соответствии с принятыми условиями разгона стола при $t = t_1$ его ускорение и $F_{da} = 0$, то

$$k_{da} = 0,25k_a \frac{t_1^2}{k^2}. \quad (14)$$

Тогда

$$F_{da}(t) = k_a k F_{xx} t_1^2 \left(1 - \frac{t}{t_1}\right) \left[1 - k \left(1 - \frac{t}{t_1}\right)\right]. \quad (15)$$

При $t = 0$ суммарное тяговое усилие привода F равно F_{xx} , то есть

$$F_{t=0} = k_a F_{xx} \frac{t_1^2}{k} (1 - k) + F_{xx} (1 - k), \quad (16)$$

откуда

$$k_a = \frac{k^2}{t_1^2 (1 - k)}. \quad (17)$$

Тогда

$$F_{da}(t) = F_{xx} \frac{k^3}{(1 - k)} \left(1 - \frac{t}{t_1}\right) \left[1 - k \left(1 - \frac{t}{t_1}\right)\right]. \quad (18)$$

При реализации предлагаемого способа управления тяговым усилием одновременно с линейным электродвигателем, создающим дополнительное тяговое усилие F_{da} , как это показано на рис. 4, основным электродвигателем привода перемещения координатного устройства через редуктор и ременную зубчатую передачу в течение времени $t_1 + t_0$ создается составляющая тягового усилия F_{ds} , необходимая, при достижении основным тяговым усилием значения F_{xx} и скорости подачи V_S , для дальнейшего перемещения стола по направляющей до контакта алмазного круга с полупроводниковой пластиной.

Величина усилия F_{xx} определяется потерями на трение в контактирующих сопряжениях направляющей и стола и сопротивлением деформации траков для подвода электроэнергии к размещенным на столе компонентам привода и системы контроля.

Реализация приведенной выше схемы позволяет при разгоне стола до рабочей скорости подачи V_S практически исключить возникновение механических колебаний стола с собственными частотами.

Исполнение данного технического решения существенно сложнее традиционного, однако при его технически и экономически обоснованном применении механические колебания стола с собственными частотами практически могут быть исключены.

Заключение. Установлено, что возникновение при разгоне стола до рабочей скорости подачи при разделении полупроводниковых пластин на кристаллы с использованием скоростных режимов обработки механических колебаний, имеющих частоты собственных колебаний, приводит к тому, что действительная координата расположения стола, его ускорение и время холостого хода в момент достижения требуемой скорости могут значительно отличаться от прогнозируемых.

Это может быть причиной возникновения ударов в начальный момент взаимодействия алмазного круга с полупроводниковой пластиной, приводящих к их сколам и поломкам.

Величины отклонений координаты и ускорений зависят от безразмерного соотношения q длины холостого хода l_1 , величины рабочей скорости подачи V_S , угловой частоты собственных колебаний стола ω_m , при этом с увеличением q эти отклонения периодически изменяются. Вследствие этого может быть подобрана и обеспечена такая величина соотношения q , при которой координата расположения стола и время холостого хода будут практически совпадать с планируемыми, а ускорение – ниже прогнозируемого в 1,4–4 раза, то есть допускается использование механических колебаний для существенного по-

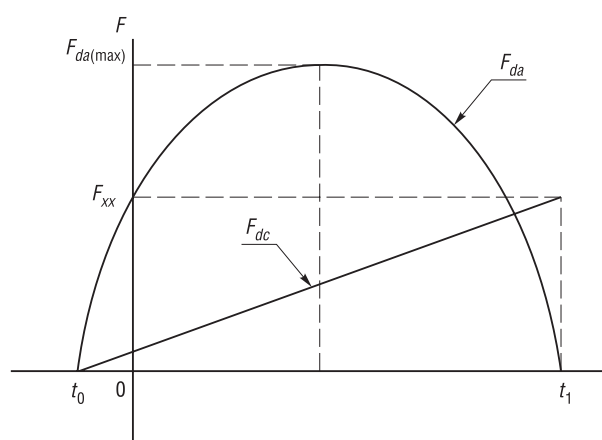


Рис. 4. Схема изменения основного и дополнительного тяговых усилий в комбинированной системе приводов
Fig. 4. Scheme of change of the primary and follow-up mowing forces in the combined system of drives

вышения плавности взаимодействия алмазного диска с полупроводниковой пластиной при их начальном контакте. Это позволит снизить вероятность возникновения или исключить сколы и поломки полупроводниковой пластины и алмазного инструмента, повысить скорость обработки в 1,5–2 раза, обрабатывать пластины с меньшей толщиной и большим диаметром.

Возможно создание комбинированной приводной системы с дополнительным, связанным непосредственно со столом приводом прямого действия, который функционирует только при разгоне и остановке стола, и специальными алгоритмами и системами управления. Их использование позволит на порядок и более снизить или исключить полностью возникновение механических колебаний при разделении полупроводниковых пластин на кристаллы.

Список использованных источников

1. Папина, С.С. Комбинированные приводы координатных систем для прецизионного деления полупроводниковых пластин на кристаллы / С.С. Папина, В.Л. Басинюк. – Минск: РИПО, 2016. – 118 с.
2. Effect of damping parameters on dynamic behavior of program controllable drives of coordinate systems with belt drive. Part 1 / V.L. Basinyuk [et al.] // J. of Friction and Wear. – 2013. – Vol. 34, № 5. – P. 362–367.

References

1. Papina S. S., Basinyuk V. L. *The combined drives of coordinate systems for high-precision division of semiconductor plates into crystals: monograph*. Minsk, Republican Institute of Vocational Education, 2016. 118 p. (in Russian).
2. Basinyuk V. L., Mardosevich E. I., Papina S. S., Lomako V.G. Effect of damping parameters on dynamic behavior of program controllable drives of coordinate systems with belt drive. Part 1. *Journal of Friction and Wear*, 2013, vol. 34, no. 5, pp. 362–367. DOI: 10.3103/s1068366613050024

Информация об авторе

Басинюк Владимир Леонидович – доктор технических наук, доцент, директор научно-технического центра – заведующий лабораторией, Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 12, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vladbas@mail.ru

Information about the author

Uladzimir L. Basiniuk – D. Sc. (Engineering), Associate Professor, Director of the Scientific & Engineering Centre – Head of the Laboratory, Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (12, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vladbas@mail.ru